

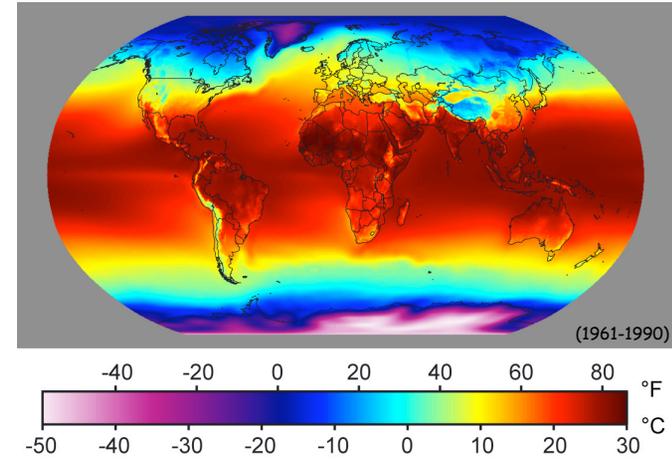


### Table des matières

#### 4. La circulation générale et le climat

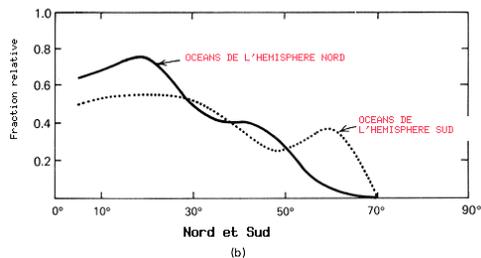
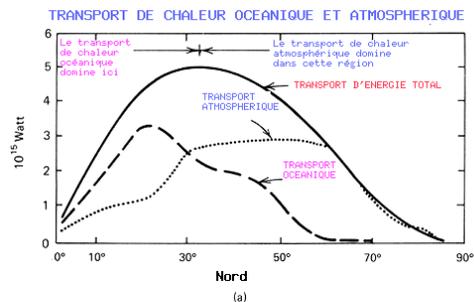
- La circulation atmosphérique
  - Les cellules de Hadley, de Ferrel et polaire
  - Systèmes météorologiques semi-permanents et saisonniers
  - Conditions météorologiques et le climat
  - Les courants-jets
    - Les ondes planétaires ou de Rossby
- Le climat
- La circulation océanique
  - Les courants marins de surface
  - La circulation thermohaline
  - El Niño

## Températures moyennes annuelles



- À l'échelle globale, la Terre est à l'équilibre radiatif : Elle émet autant d'énergie qu'elle en reçoit du soleil.
- Cependant l'ensoleillement oblique sur le globe cause un réchauffement plus marqué à l'équateur qu'aux pôles, et...

- ... un transport de chaleur des latitudes ayant un surplus énergétique vers les latitudes ayant un déficit en résulte.



## La circulation générale

### ➤ La circulation atmosphérique

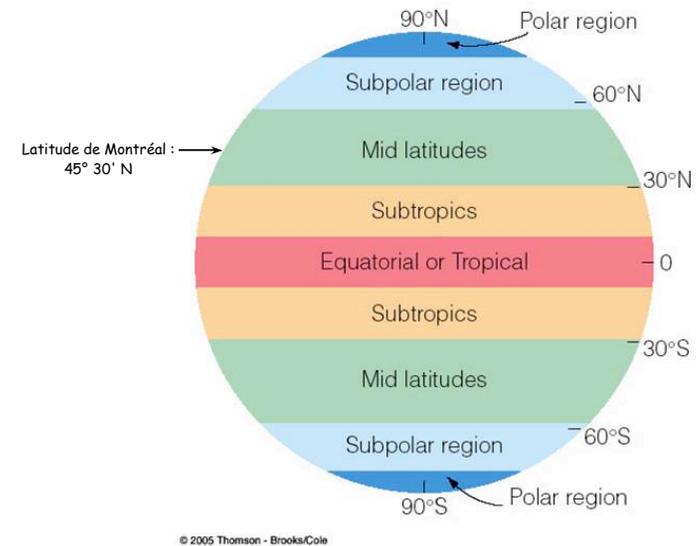
Les perturbations atmosphériques (hautes et basses pressions) entraînent l'air chaud vers les Pôles et l'air froid vers l'équateur.

### ➤ La circulation océanique

Les courants marins contribuent efficacement à amoindrir les écarts de température sur la planète.

## La circulation atmosphérique

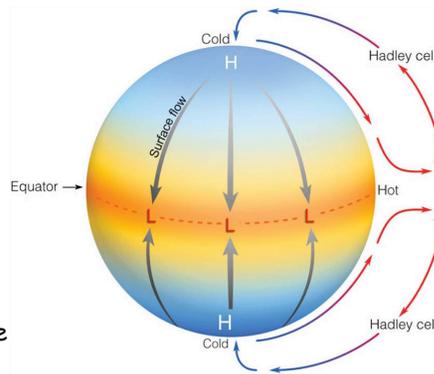
## Les régions de la Terre



## Modèle de circulation atmosphérique

### Cellule de Hadley

- Supposons que
  - La surface de la Terre est uniforme à l'horizontale (Ex : de l'eau, de la glace, ...),
  - Le soleil est directement au-dessus de l'équateur et
  - Il n'y a pas de rotation.
- Dans ces conditions, il se formerait une énorme cellule de convection d'origine thermique parfaitement symétrique entre les Pôles et l'équateur :

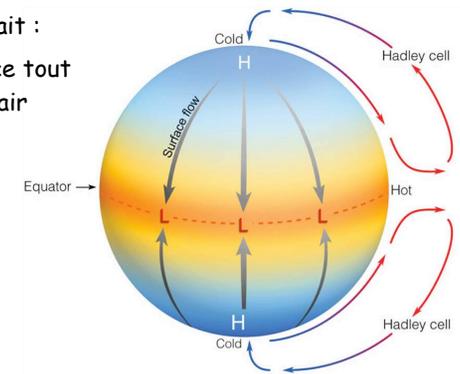


➤ La cellule de Hadley.

## Modèle de circulation atmosphérique

### Cellule de Hadley

- La cellule de Hadley présenterait :
  - Des dépressions en surface tout au long de l'équateur où l'air chaud se soulève, et
  - Un anticyclone en surface aux Pôles où l'air froid redescend.
  - En surface, les vents souffleraient des Pôles vers l'équateur
  - En altitude, les vents souffleraient de l'équateur aux Pôles.



➤ Mais à cause de la rotation de la Terre (force de Coriolis), cette circulation ne se produit pas.

## Modèle de circulation atmosphérique

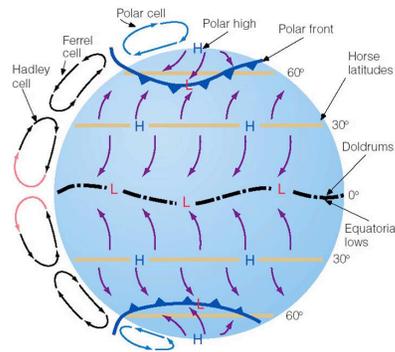
### Les cellules de Hadley, de Ferrel et polaire

4-9

- La rotation de la Terre et le chauffage inégal selon la latitude, sont les causes de la fragmentation de la cellule unique dans trois cellules dans chaque hémisphère :

- la cellule de Hadley,
- la cellule de Ferrel et
- la cellule polaire.

- Il y a encore un anticyclone en surface aux Pôles, plus froids.
- Il y a encore des dépressions tout au long de l'équateur, plus chaud.
- Il y a encore une cellule de Hadley mais elle s'étend seulement entre 30° N et 30° S de latitude.

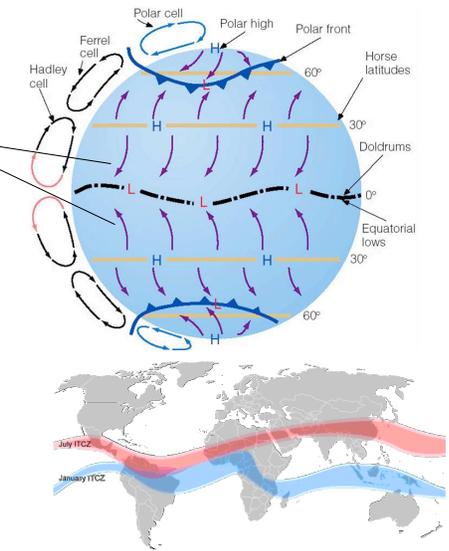


## Modèle de circulation atmosphérique

### Les cellules de Hadley, de Ferrel et polaire

4-10

- Les dépressions équatoriales correspondent à la zone de convergence intertropicale (ZCIT) où les vents Alizés convergent.
- La cellule de Hadley est une cellule convective d'origine thermique. Puisque à ces latitudes les gradients thermiques en surface sont relativement faibles, les vents de surfaces, les Alizés, sont aussi généralement faibles. Des conditions d'accalmie se produisent aussi.

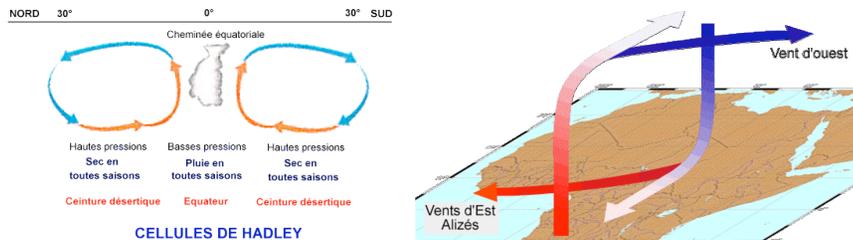


## Modèle de circulation atmosphérique

### Les cellules de Hadley, de Ferrel et polaire

4-11

- L'air chaud se soulève à l'équateur et il forme de gros nuages de type cumulus.
- Une fois à la tropopause il se dirige vers les Pôles.
- À cause de la rotation de la Terre (force de Coriolis), les vents dévient.

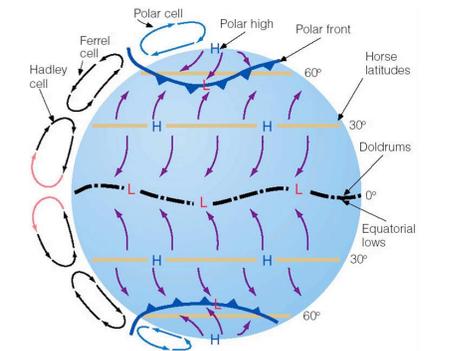


## Modèle de circulation atmosphérique

### Les cellules de Hadley, de Ferrel et polaire

4-12

- Aux latitudes subtropicales, l'air en altitude dirigé vers les Pôles converge à cause du rapprochement des méridiens.
- Il y a donc augmentation de la masse en altitude et pour cela, la pression augmente à la surface (Anticyclone subtropical).
- L'anticyclone à la surface cause un écoulement de l'air de retour vers l'équateur.
- L'air descend vers la surface à environ 30° de latitude.
  - Air sec, ciels clairs, températures élevées, c'est à ces latitudes qu'on retrouve la majorité des déserts.
- Les vents en surface sont faibles.

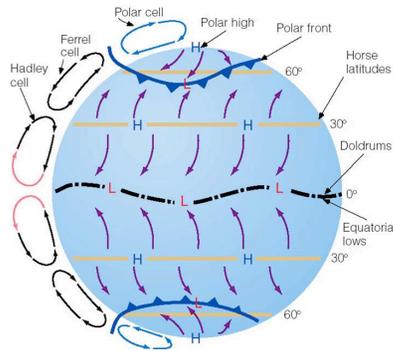


## Modèle de circulation atmosphérique

### Les cellules de Hadley, de Ferrel et polaire

4-13

- Dans l'hémisphère nord, les vents sont déviés à droite,
  - L'écoulement en surface vers le sud correspond aux Alizés du NE, et
  - L'écoulement en surface vers le nord correspond aux vents d'Ouest.
- Ces mêmes vents sont plus stables dans l'hémisphère sud puisque la surface est plus uniforme grâce aux océans.
- À noter, dans l'hémisphère sud, les vents sont déviés vers la gauche contrairement à l'hémisphère nord où ils sont déviés vers la droite.

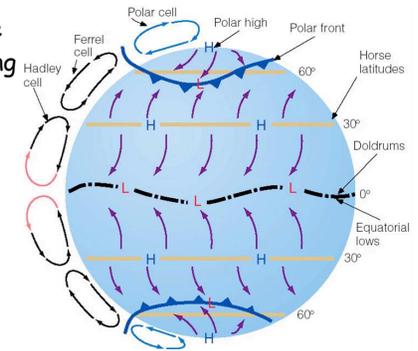


## Modèle de circulation atmosphérique

### Les cellules de Hadley, de Ferrel et polaire

4-14

- L'air chaud d'origine subtropicale rencontre l'air froid polaire le long du **Front polaire** sans qu'il y ait véritablement mélange des deux masses d'air.
- Une zone dépressionnaire sub-polaire s'établit vers les 60° de latitude en permettant ainsi à la cellule de Ferrel de se former.
- L'air en surface converge et se soulève vis-à-vis la zone dépressionnaire.
- Des nuages de type cumulus et des dépressions se forment à ces latitudes.
- Au-delà du front polaire, l'écoulement en surface est dévié et correspond aux vents polaires de l'est.



4-15

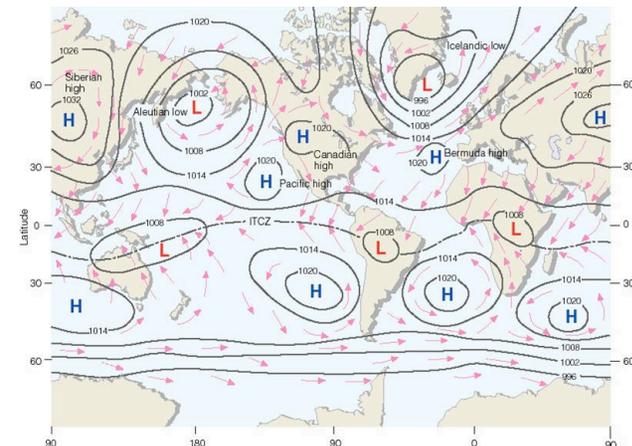
## Systèmes météorologiques semi-permanents

## Vents et pressions moyens en surface

4-16

### • Systèmes semi-permanents : Janvier

- Anticyclone de Sibérie
- Dépression des Îles Aléoutiennes
- Anticyclone du Pacifique
- Anticyclone du Canada
- Dépression d'Islande
- Anticyclone des Bermudes/Açores

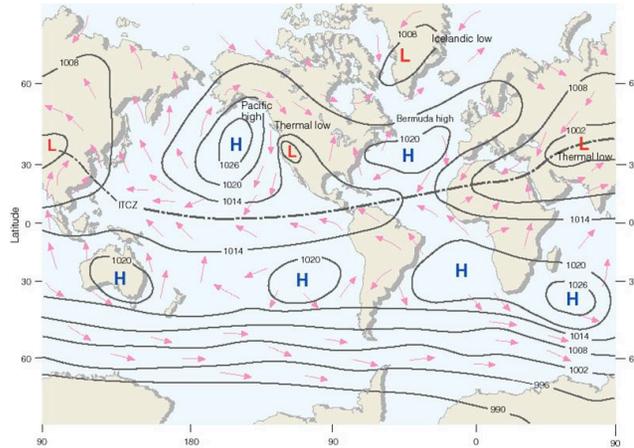


## Vents et pressions moyens en surface

4-17

### • Systèmes semi-permanents : Juillet

- Anticyclone du Pacifique
- Dépression thermique du SO des E.U.
- Anticyclone des Bermudes/Açores
- Dépression d'Islande
- Dépression de mousson



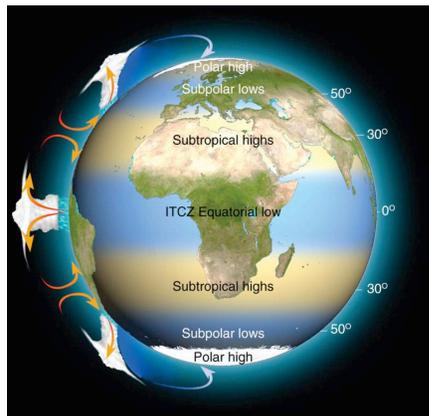
4-18

## Conditions météorologiques

## Conditions météorologiques

4-19

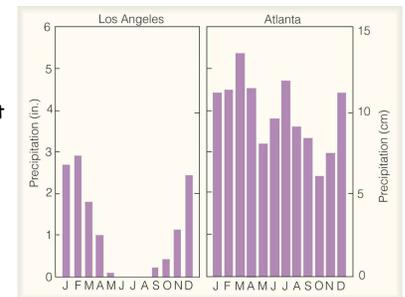
- Équateur :
  - zone dépressionnaire
  - nuageux
- 30° N :
  - zone anticyclonique
  - ensoleillé
- 45° N - 60° N :
  - zone dépressionnaire
  - nuageux
- Latitudes polaires :
  - zone anticyclonique
  - Clair
- Les différentes zones varient annuellement de 10° à 15° N-S à cause de la variation saisonnière de l'inclinaison du soleil.
- Les images satellitaires montrent fréquemment une répartition des nuages en accord avec la description ci-dessus.

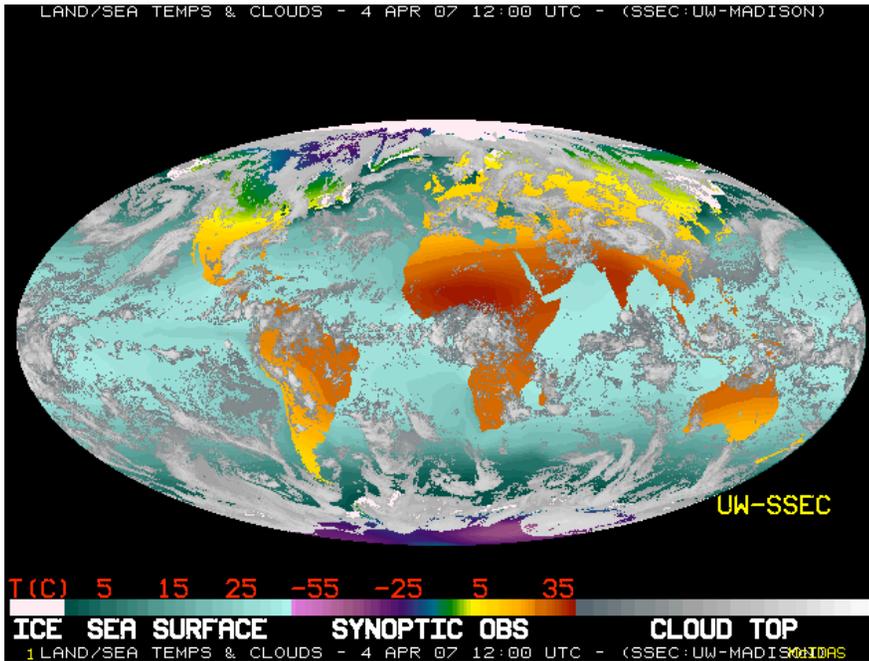


## Temps associé aux anticyclones du Pacifique et des Bermudes

4-20

- Anticyclone du Pacifique
  - En été,
    - il se déplace vers le nord et
    - il produit des fortes inversions de température, causé par la subsidence à l'est de son centre.
  - En hiver,
    - il se déplace vers le sud
    - permettant ainsi au front polaire d'amener des précipitations dans le SO des E.U.
- Anticyclone des Bermudes/Açores
  - Il transporte de l'air subtropical chaud et humide vers les E.U. et le sud du Canada.
  - Cet air peut être instable, si l'air froid superpose l'air chaud au-dessus l'océan.
- Le temps associé aux anticyclones tropicaux dépend étroitement du côté où on est par rapport au système!



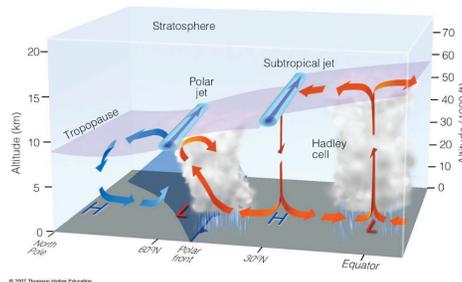


## Les courants-jets

## Les courants-jets

4-23

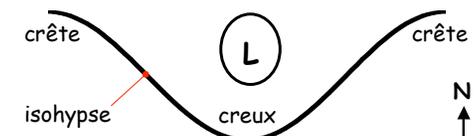
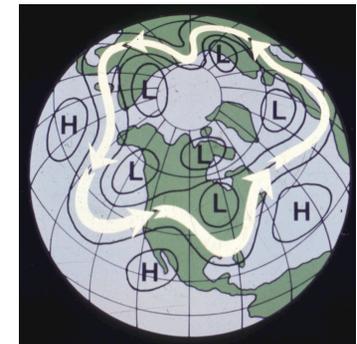
- Les courants-jets constituent une partie intégrante de la circulation générale.
- **Le jet polaire** est situé environ à 10 km de hauteur au-dessus du front polaire.
- **Le jet subtropical** est situé environ à 13 km de hauteur.
  - Il est souvent visible comme une traînée d'humidité qui s'étend des tropiques jusqu'aux régions subtropicales.



## Les courants-jets

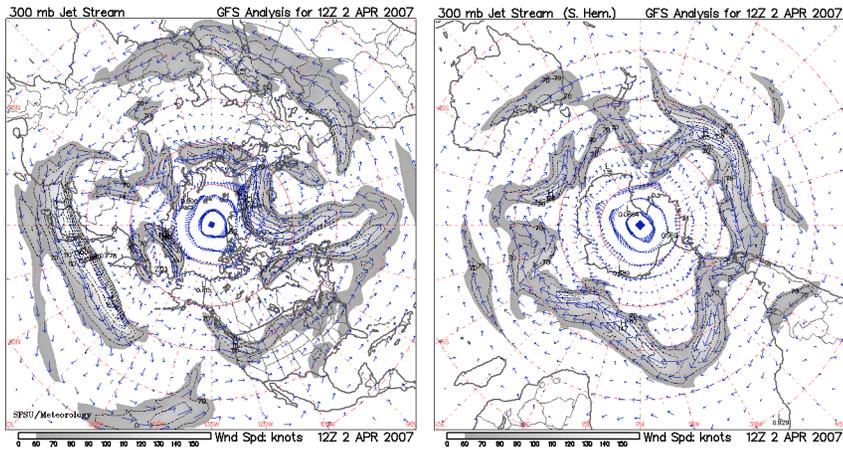
4-24

- Les courants-jets entourent le globe en ondulant comme des rubans.
- Ils ont une longueur de milliers de kilomètres, une largeur de quelques centaines de kilomètres et une hauteur de quelques kilomètres. Les **cœurs du jet** ("jet streaks") où les vents sont maximaux sont beaucoup plus étroits.
- Ils présentent souvent des creux et des crêtes.



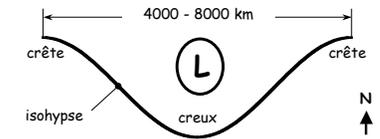
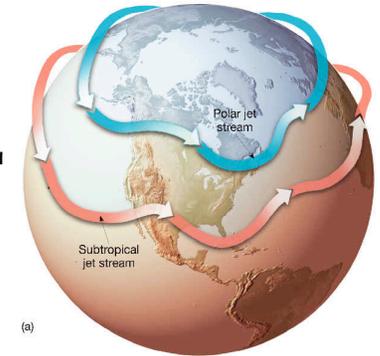
## Les courants-jets

### 300 hPa - Hémisphère Nord et Sud

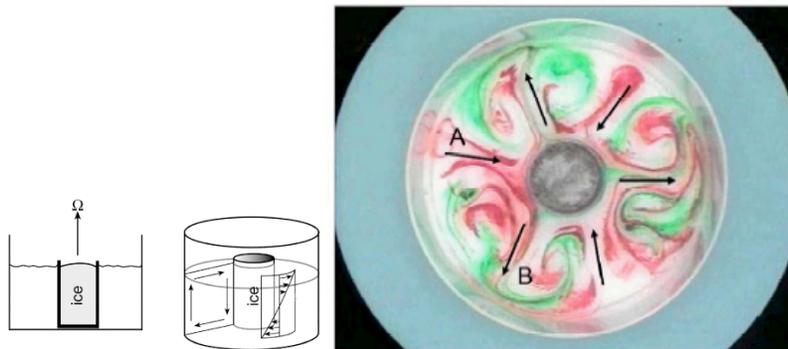


## Les ondes planétaires ou de Rossby

- La formation d'**ondes longues** en altitude est une caractéristique d'une planète en rotation, chauffée inégalement.
- Elles sont appelées ondes planétaires ou de Rossby.
- Habituellement de 4 à 6 ondes sont assez pour entourer le globe.
- Leur longueur d'onde varie entre 4000 et 8000 km.
- Elles sont presque stationnaires ou se déplacent très lentement vers l'est ou l'ouest.



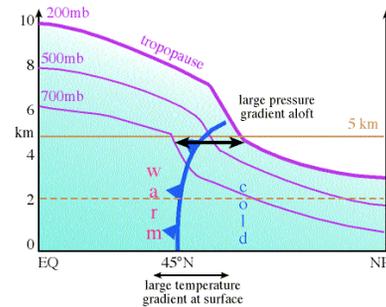
## L'expérience du bassin tournant



## Le courant-jet polaire

## Formation du courant-jet polaire

- La hauteur de la tropopause est proportionnelle à la température moyenne de la troposphère.
- Le fort gradient de température en surface en relation au front polaire a comme conséquence de produire un fort gradient de pression en altitude.



## Formation du courant-jet polaire

- L'intensité du vent est proportionnelle à l'amplitude du gradient de pression.
- Plus le gradient de température en surface est fort, plus le gradient de pression en altitude est fort et plus le vent est fort aussi.
  - En hiver, les masses d'air arctique et tropical sont responsables d'un fort contraste thermique en surface et les vents des courants-jets sont très forts.
  - En été, les contrastes de température sont moins prononcés et les vents des courants-jets sont beaucoup plus faibles.



## Les méandres du courant-jet polaire

### Le transport de chaleur

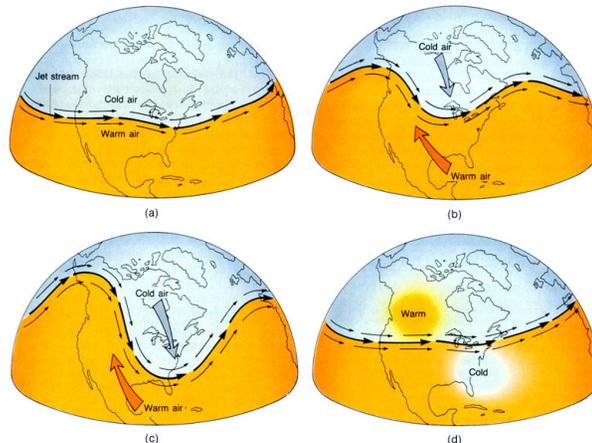
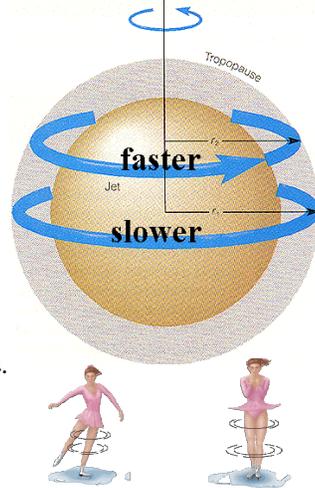


Figure 8-9 Cyclic changes that occur in the upper-level airflow of the westerlies. The flow, which has the jet stream as its axis, starts out nearly straight and then develops meanders that are eventually cut off. (After J. Namias, WCAP)

## Le courant-jet subtropical

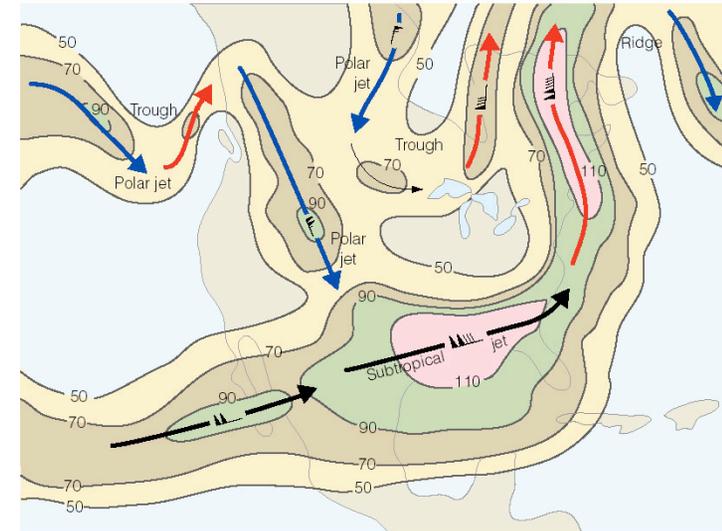
## Formation du courant-jet subtropical

- Le courant-jet subtropical se forme du côté polaire de la cellule de Hadley.
- Il est attribuable à l'augmentation de la vitesse de rotation de l'air en se déplaçant de l'équateur vers les latitudes subtropicales par conservation du moment cinétique\*.
- Il n'est pas caractérisé par un fort gradient thermique en surface, mais plutôt le gradient dans la mi-troposphère.
- Quand le jet polaire descend, il peut fusionner avec le jet subtropical et former un seul courant-jet.



\* Le moment cinétique est une grandeur proportionnelle à la vitesse angulaire de l'objet et qui dépend de sa distribution de masse autour de l'axe de rotation.

## courants-jets à 300 hPa le 10 mars 1998



© 2005 Thomson - Brooks/Cole

## Le courant-jet subtropical

- Le courant-jet subtropical est généralement plus faible et plus haut que le courant-jet polaire correspondant.
- Il est beaucoup moins relié aux déplacements des systèmes météorologiques que le courant-jet polaire, par contre il est accompagné de périodes sporadiques de convection profonde, de même que des fortes averses de pluie.

## Le climat

- La **climatologie** réfère aux **conditions météorologiques moyennes** en un lieu donné soit pour **une année, une saison, ou une journée**. Afin d'établir les caractéristiques climatiques, des données couvrant au moins une période de **30 ans** sont habituellement utilisées.

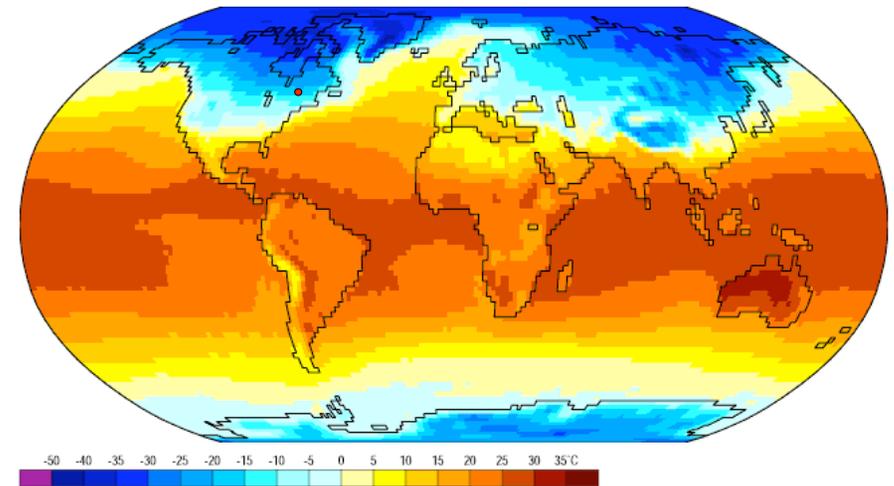
### Les éléments descriptifs du climat les plus importants :

- La température de l'air
- L'humidité de l'air
- Les types de nuages et la nébulosité
- Les types de précipitations et la pluviométrie
- La pression
- La vitesse et la direction du vent

## Température de l'air : Janvier

Air Temperature

Jan

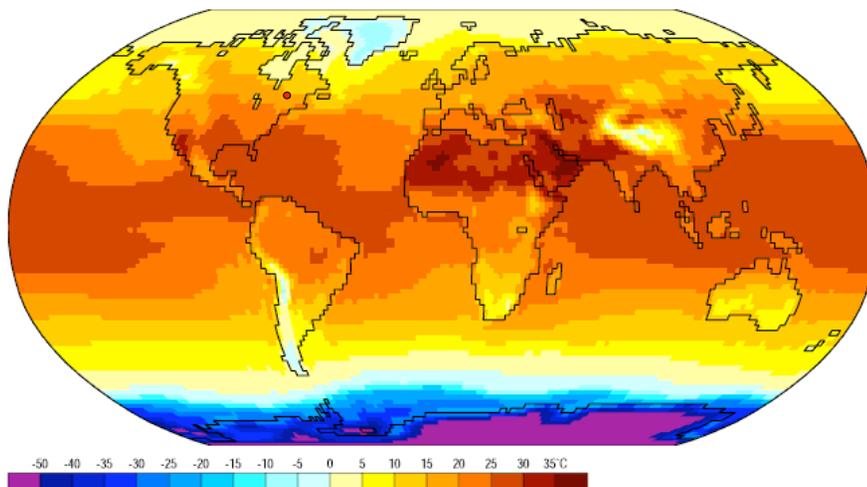


Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies

## Température de l'air : Juillet

Air Temperature

Jul



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies

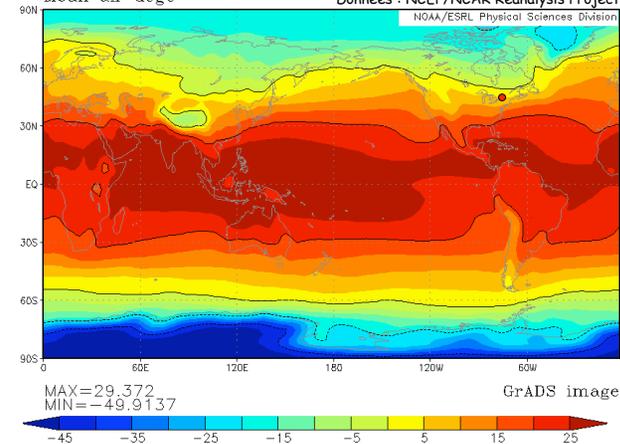
## Température de l'air : Moyenne annuelle

Faites votre propre carte : <http://www.cdc.noaa.gov/>

lon: plotted from 0.00 to 357.50  
 lat: plotted from -90 to 90.00  
 t: averaged over Jan 1959 to Dec 1997  
 lev: 0

Mean air degC

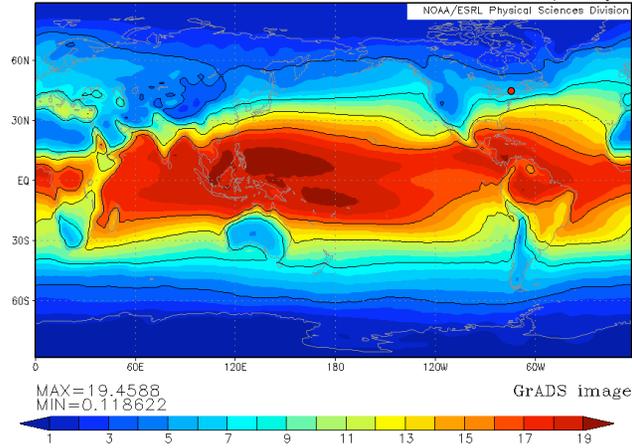
Données : NCEP/NCAR Reanalysis Project



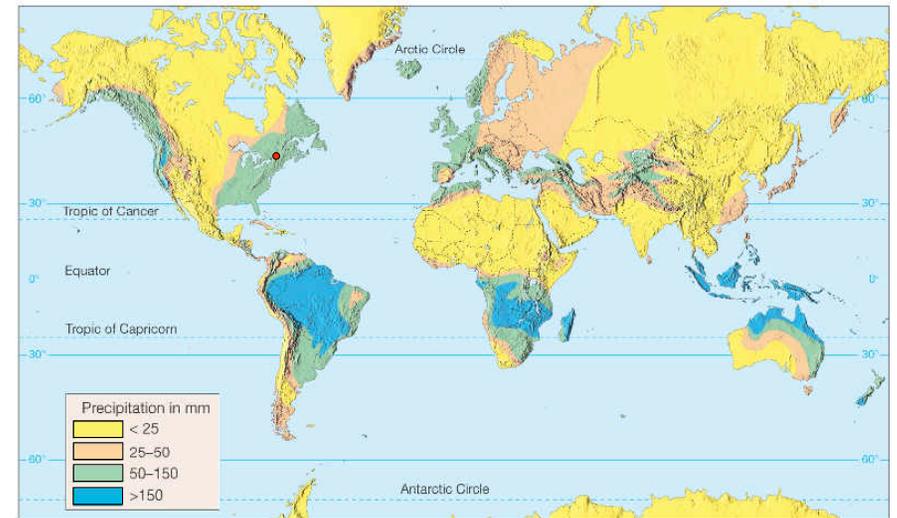
## Humidité spécifique : Moyenne annuelle

lon: plotted from 0.00 to 358.13  
 lat: plotted from -88.54 to 88.54  
 t: averaged over Jan 1959 to Dec 1997  
 lev: 0

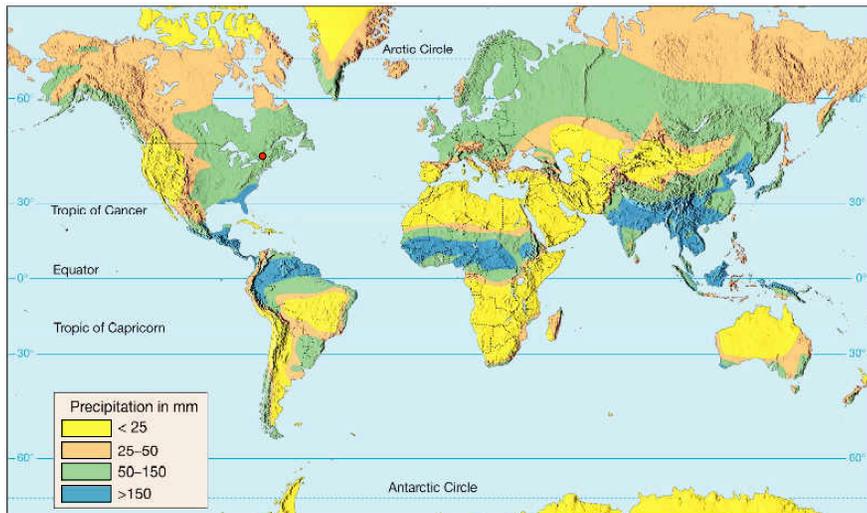
Mean shum grams/kg      Données : NCEP/NCAR Reanalysis Project



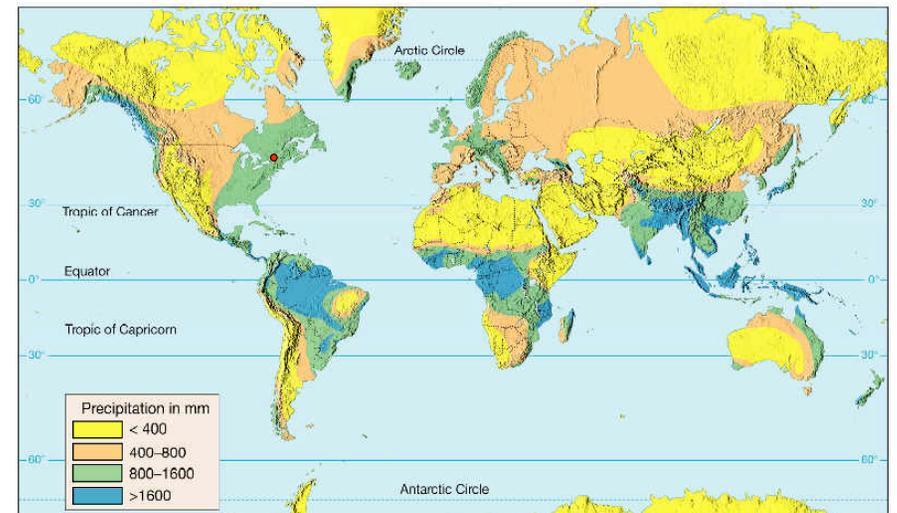
## Les précipitations : Janvier



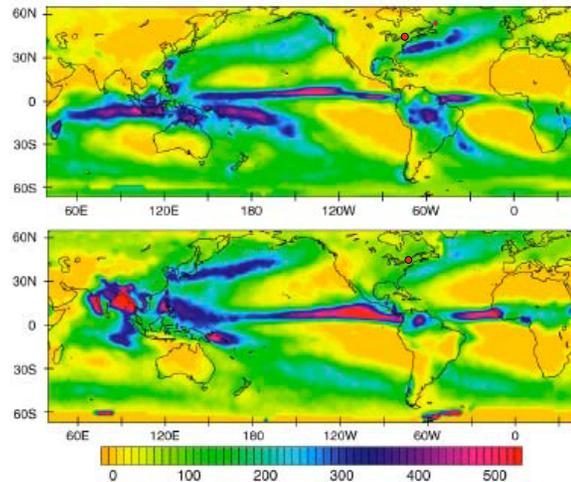
## Les précipitations : Juillet



## Les précipitations : Année



## Précipitation



Moyenne climatologique de la précipitation en cm en janvier (en haut) et en juillet (en bas). Wallace et Hobbs, 2006.

## Classification de Köppen

Wladimir Peter Köppen a mis au point dans les années 1920 un système de classification des climats, basée uniquement sur

- les précipitations et
- les températures.

Un climat est ainsi repéré par un code de **deux** ou **trois lettres**.

## Classification de Köppen

Wladimir Peter Köppen a mis au point dans les années 1920 un système de classification des climats, basée uniquement sur les précipitations et les températures. Un climat est ainsi repéré par un code de deux ou trois lettres :

1<sup>o</sup> lettre : type de climat

Code	Type	Description
A	Climat tropical	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température moyenne de chaque mois de l'année &gt; 18°C</li> <li>▪ Pas de saison hivernale</li> <li>▪ Fortes précipitations annuelles (supérieure à l'évaporation annuelle)</li> </ul>
B	Climat sec	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Évaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles</li> <li>▪ Aucun cours d'eau permanent</li> </ul>
C	Climat tempéré chaud	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Températures moyennes des 3 mois les plus froids comprises entre -3°C et 18°C</li> <li>▪ Température moyenne du mois le plus chaud &gt; 10°C</li> <li>▪ Les saisons été et hiver sont bien définis</li> </ul>
D	Climat tempéré froid	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température moyenne du mois le plus froid &lt; -3°C</li> <li>▪ Température moyenne du mois le plus chaud &gt; 10°C</li> <li>▪ Les saisons été et hiver sont bien définis</li> </ul>
E	Climat polaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température moyenne du mois le plus chaud &lt; 10°C</li> <li>▪ La saison d'été est très peu marquée</li> </ul>

## Classification de Köppen

2<sup>o</sup> lettre : régime pluviométrique

Code	Description	S'applique à
S	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Climat de steppe</li> <li>▪ Précipitations annuelles comprises entre 380 et 760 mm</li> </ul>	B
W	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Climat désertique</li> <li>▪ Précipitations annuelles &lt; 250 mm</li> </ul>	B
f	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Climat humide</li> <li>▪ Précipitations tous les mois de l'année</li> <li>▪ Pas de saison sèche</li> </ul>	A-C-D
w	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Saison sèche en hiver</li> </ul>	A-C-D
s	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Saison sèche en été</li> </ul>	C
m	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Climat de mousson</li> <li>▪ Précipitations annuelles &gt; 1500 mm</li> <li>▪ Précipitations du mois le plus sec &lt; 60 mm</li> </ul>	A
T	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température moyenne du mois le plus chaud comprise entre 0 et 10°C</li> </ul>	E
F	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Température moyenne du mois le plus chaud &lt; 0°C</li> </ul>	E
M	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Précipitations abondantes</li> <li>▪ Hiver doux</li> </ul>	E

On obtient donc les catégories suivantes :

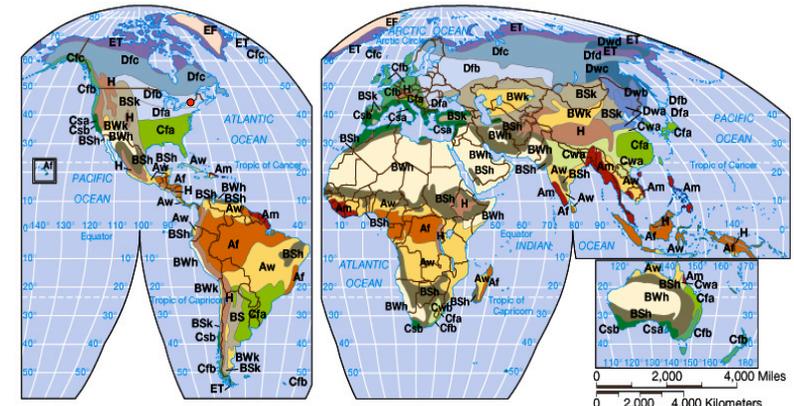
- Af : climat tropical humide
- Aw : climat de savane tropicale
- Am : climat de mousson
- BS : climat de steppe
- BW : climat désertique
- Cf : climat tempéré humide sans saison sèche
- Cw : climat tempéré humide avec hiver sec
- Cs : climat tempéré humide avec été sec (climat méditerranéen)
- Df : climat tempéré froid sans saison sèche
- Dw : climat tempéré froid avec hiver sec
- ET : climat de toundra
- EF : climat d'inlandsis
- EM : climat subarctique maritime

# Classification de Köppen

### 3<sup>e</sup> lettre : variations de température

Code	Description	S'applique à
a : été chaud	Température moyenne du mois le plus chaud > 22°C	C-D
b : été tempéré	Température moyenne du mois le plus chaud < 22°C Températures moyennes des 4 mois les plus chauds > 10°C	C-D
c : été court et frais	Température moyenne du mois le plus chaud < 22°C Températures moyennes mensuelles > 10°C pour moins de 4 mois Température moyenne du mois le plus froid > -38°C	C-D
d : hiver très froid	Température moyenne du mois le plus froid < -38°C	D
h : sec et chaud	Température moyenne annuelle > 18°C	B
k : sec et frais	Température moyenne annuelle < 18°C	B

# Classification de Köppen

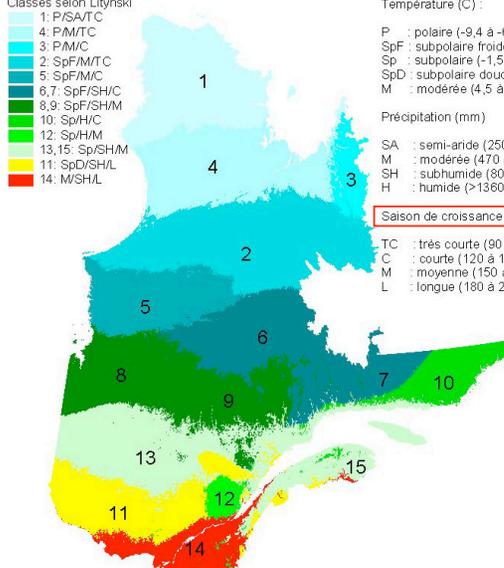


- A TROPICAL HUMID CLIMATES**
  - Af Tropical wet climate
  - Am Tropical monsoonal climate
  - Aw Tropical savanna climate
- B DRY CLIMATES**
  - BWh Subtropical desert
  - BWk Midlatitude desert
  - BSh Subtropical steppe
  - BSk Midlatitude steppe
- C MILD MIDLATITUDE CLIMATES**
  - Cfa Humid subtropical, no dry season
  - Cwa Humid subtropical, winter-dry
  - Cwb
  - Cfb Marine west coast, no dry season
  - Cfc
  - Csa Mediterranean summer-dry
  - Csb
- D SEVERE MIDLATITUDE CLIMATES**
  - Dfa Humid continental, no dry season
  - Dfb Humid continental, winter-dry
  - Dwa Humid continental, winter-dry
  - Dfc Subarctic, no dry season
  - Dfd Subarctic, winter-dry
  - Dwc Subarctic, winter-dry
- E POLAR CLIMATES**
  - ET Tundra
  - EF Ice cap
- H HIGHLAND**
  - H Cold climates due to elevation

# Classification climatique du Québec

- Classes selon Litynski
- 1: P/SAT/C
  - 4: P/M/T/C
  - 3: P/M/C
  - 2: SpF/M/T/C
  - 5: SpF/M/C
  - 6,7: SpF/SH/C
  - 8,9: SpF/SH/M
  - 10: Sp/H/C
  - 12: Sp/H/M
  - 13,15: Sp/SH/M
  - 11: SpD/SH/L
  - 14: M/SH/L

- Température (C) :
- P : polaire (-9,4 à -8,0)
  - SpF : subpolaire froide (-9,4 à -6,0)
  - Sp : subpolaire (-1,5 à -1,9)
  - SpD : subpolaire douce (1,9 à 4,5)
  - M : modérée (4,5 à 6,8)
- Précipitation (mm)
- SA : semi-aride (250 à 469)
  - M : modérée (470 à 799)
  - SH : subhumide (800 à 1359)
  - H : humide (>1360)
- Saison de croissance (jours)
- TC : très courte (90 à 119)
  - C : courte (120 à 149)
  - M : moyenne (150 à 179)
  - L : longue (180 à 209)



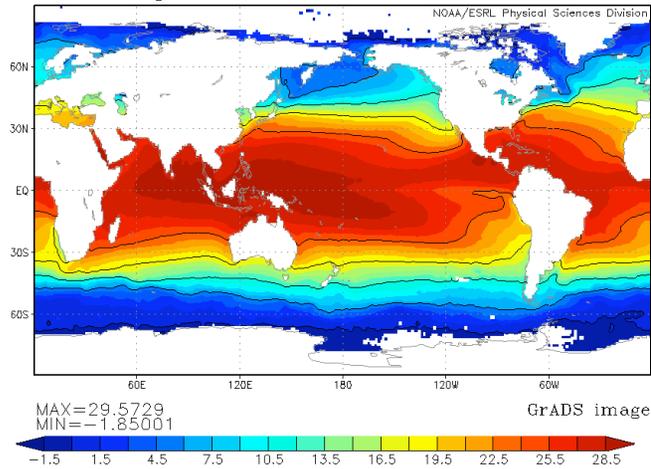
1:10000000

# La circulation océanique

## Température de l'eau : Moyenne annuelle

4-53

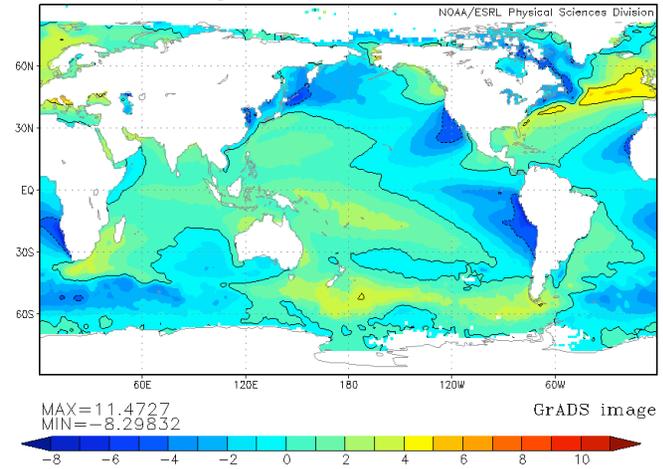
lon: plotted from 0.50 to 359.50  
 lat: plotted from -89.5 to 89.50  
 t: averaged over Jan 1960 to Dec 2005  
 lev: 0  
 Mean sst degC



## Température de l'eau : Anomalie

4-54

lon: plotted from 0.50 to 359.50  
 lat: plotted from -89.5 to 89.50  
 t: averaged over Jan 1960 to Dec 2005  
 lev: 0  
 Mean Eddy sst degC



## Le Gulf stream

4-55

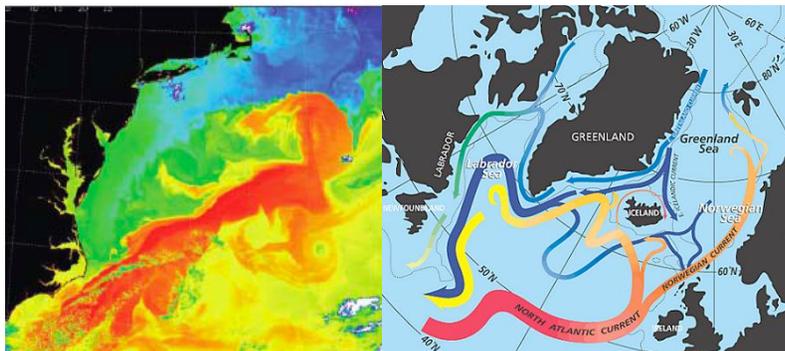
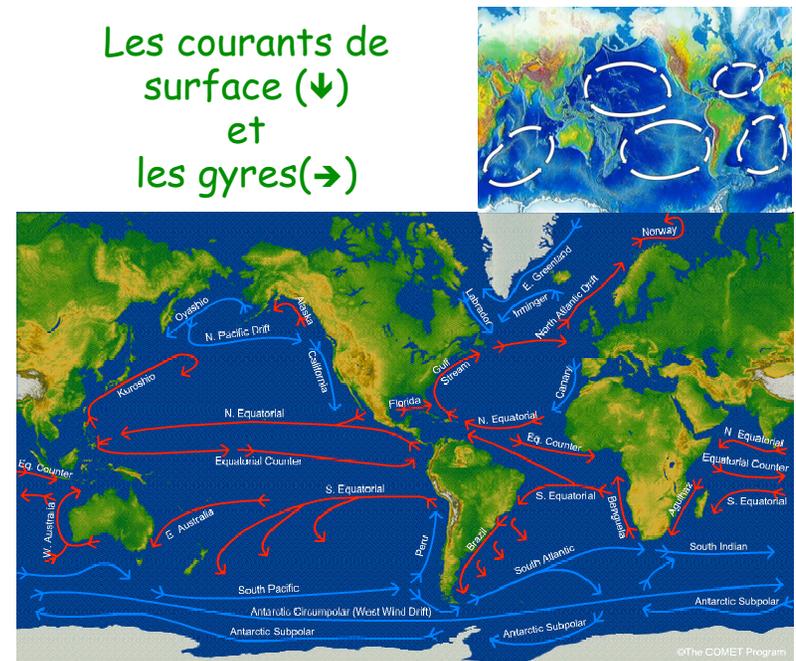


Fig. 2.5 Eddies along the landward edge of the Gulf Stream, as revealed by the pattern of sea surface temperature. Temperatures range from  $\sim 20^{\circ}\text{C}$  in the orange regions down to  $\sim 6^{\circ}\text{C}$  in the darkest blue regions. Note the sharpness of the boundary and the indications of turbulent mixing between the waters of the Gulf Stream and the colder Labrador Current to the north of it. [Based on NASA TERRA/MODIS imagery. Courtesy of Otis Brown.]

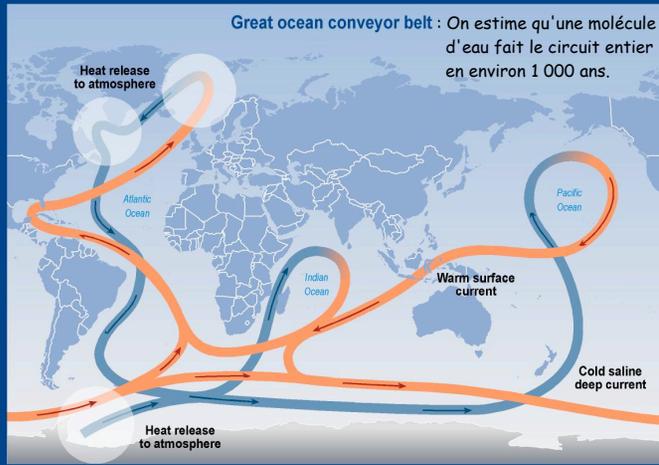
## Les courants de surface (↓) et les gyres (→)

4-56



# La circulation thermohaline

4-57



SYR - FIGURE 4-2



# Circulation thermohaline

4-58



4-59

# ENSO : El Niño Southern Oscillation (El Niño oscillation australe)

# Circulation de Walker

4-60

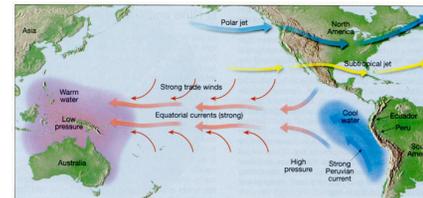
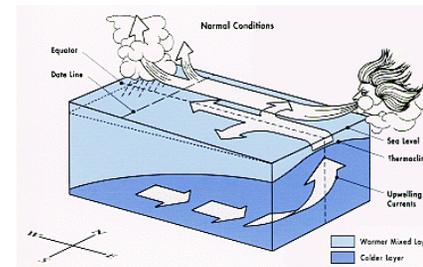
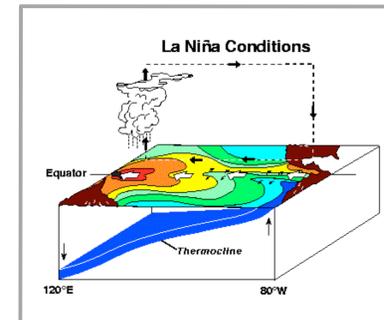
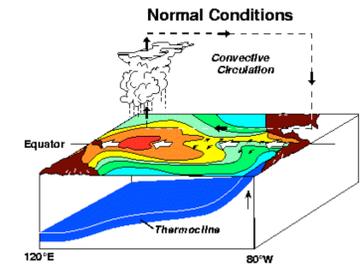
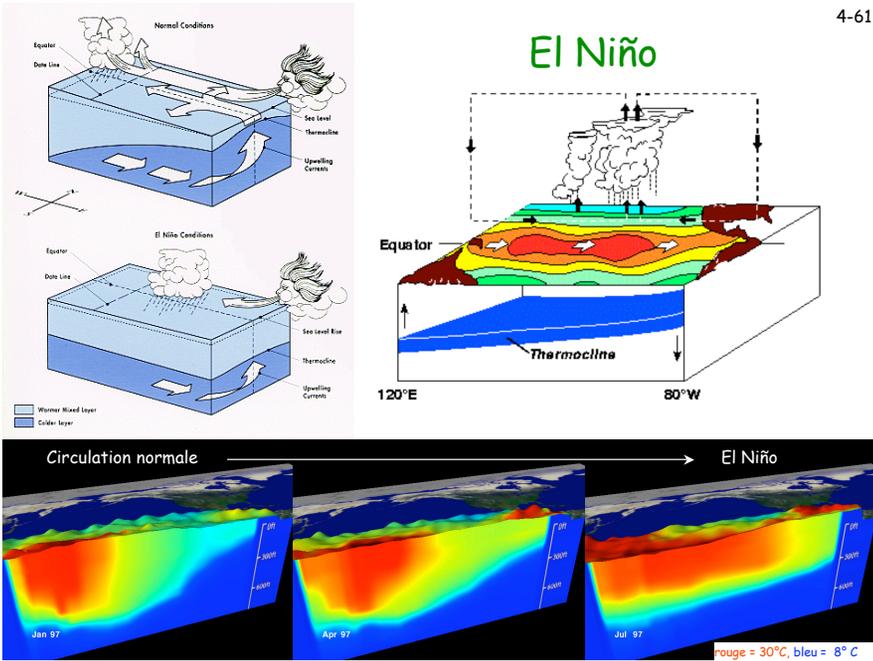


Fig.6 Normally, the trade winds and strong equatorial currents flow toward the west. At the same time, an intense Peruvian current causes upwelling of cold water along the west coast of South America.

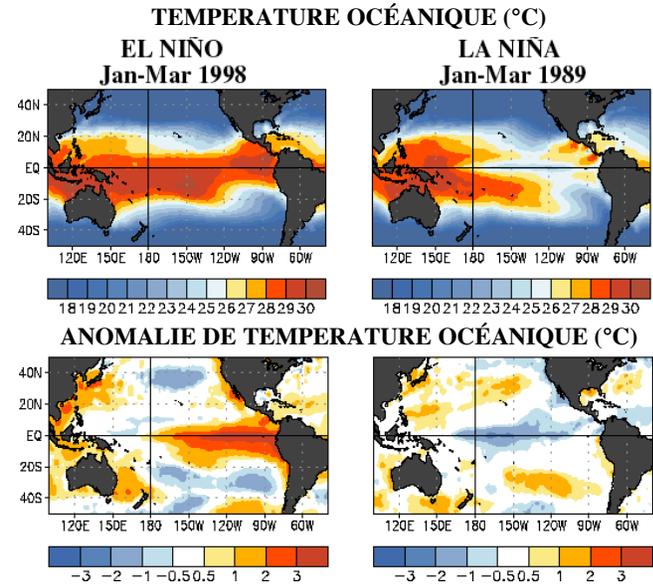


La thermocline est une couche de transition thermique rapide entre les eaux superficielles et les eaux profondes.

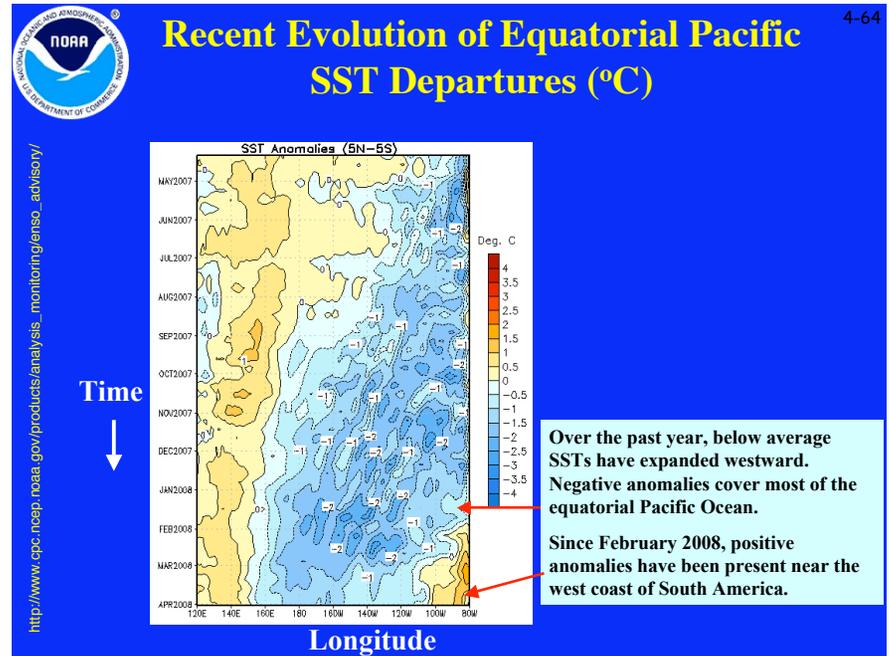
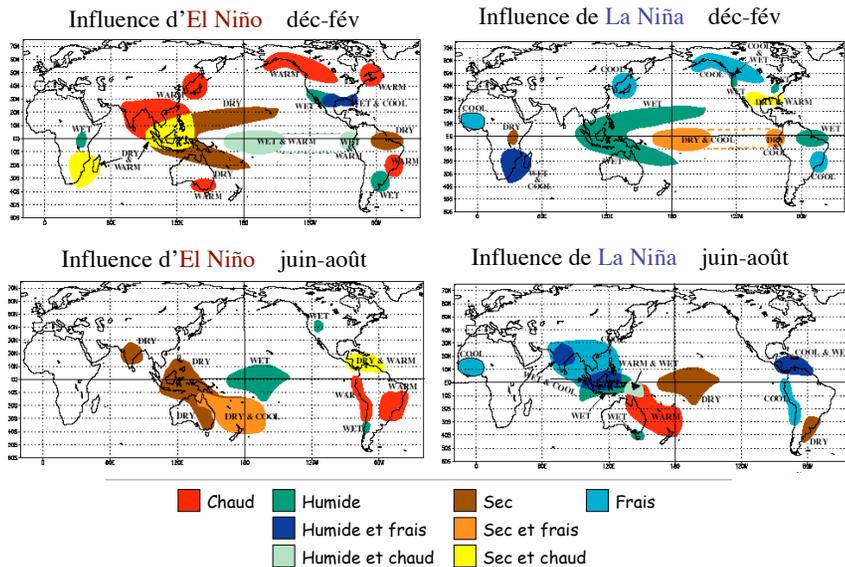




## Anomalie saisonnière de la SST



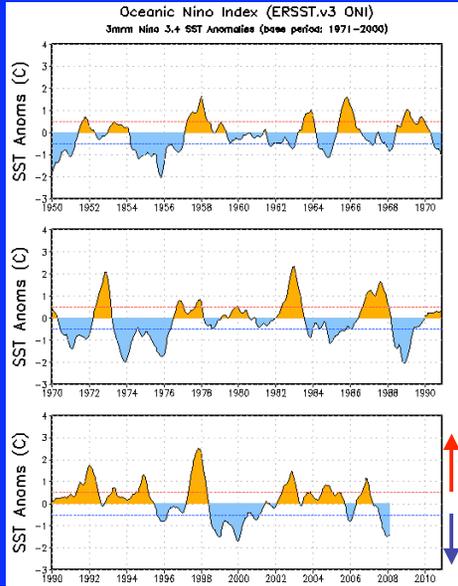
## El Niño - La Niña





# ONI (°C): Evolution since 1950

The most recent ONI value (January – March 2008) is -1.4°C.



El Niño  
neutral  
La Niña



**Cirrus de courant-jet** Cette photo, prise à une altitude d'environ 320 km, montre une bande de cirrus produits par les vents d'ouest du courant-jet qui s'étend entre la Mer Rouge à l'Arabie saoudite. L'uniformité dans la bande de nuage reflète que le parcours étroit du courant-jet se déplace de la gauche vers la droite sur l'image. Cette photo provenant d'une navette, montre que la bande nuageuse comprend une série de nuages distincts et également espacés. Ils sont formés par un mouvement ondulatoire dans le courant d'air en altitude.  
(Gracieuseté de LPI/NASA. Picture #13-32-1099)